

УДК 621.391.26 : 681.7.069.32

Ю. С. Бехтин, Ю. А. Филатов

(Рязань)

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ТОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ
ПО ДАННЫМ МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО ФПУ

Рассматривается эффективный при сильно коррелированных шумах метод измерения координат точечных объектов по данным ФПУ, содержащего многоэлементный линейчатый фотоприемник. Обосновывается модель полезного сигнала, наблюдаемого на выходе ФПУ, учитывающая случайное расположение объекта относительно фотоприемных площадок. Показано, что данный метод инвариантен к величине структурной помехи и допускает относительно простую техническую реализацию. Приводятся результаты сравнения по точности измерения координат с известным методом со взвешиванием.

Введение. Большинство методов измерения координат точечных объектов основано на корреляционно-экстремальной обработке и различных модификациях алгоритмов со взвешиванием [1, 2]. При этом обычно полагают, что изображение точечного объекта (пятно рассеяния) перекрывает несколько фоточувствительных площадок (ФЧП) приемника излучения, шумы приемника не коррелированы, фон и структурная помеха отсутствуют и т. п. В этих условиях указанные методы обеспечивают высокую точность измерения (до 0,01 размера ФЧП) координат точечного объекта [1]. Однако в ряде разработок оптико-электронных систем с фотоприемными устройствами (ФПУ), которые содержат многоэлементные линейчатые фотоприемники, подобные предположения оказываются недопустимыми по следующим причинам. Во-первых, диаметр пятна рассеяния часто бывает согласован с размером ФЧП. Во-вторых, шумы в каждом канале ФПУ оказываются сильно коррелированными вследствие большой постоянной времени фотоприемника. В-третьих, имеет место значительная по величине структурная помеха, обусловленная действием темнового тока фотоприемника. Наконец, при последовательном опросе большого числа каналов ФПУ встроенным электронным коммутатором точечный объект представляется ограниченным числом дискретных отсчетов, разделенных периодом опроса линейки фотоприемника. Предлагаемый ниже метод измерения координат точечных объектов является попыткой в полной мере учесть отмеченные выше особенности формирования кадра изображения многоэлементным ФПУ, техническая реализация которого обеспечивала бы измерение координат в темпе развертки изображения.

Постановка задачи. Если диаметр пятна рассеяния равен размеру ФЧП, то при сканировании возможны две ситуации: пятно попадает на одну (рис. 1, а) и на две (рис. 1, б) ФЧП. Ограничиваясь случаем равномерного сканирования, введем единую двумерную модель полезного сигнала на выходе ФПУ, допускающую разделение переменных и учитывающую две ситуации взаимного расположения пятна рассеяния и ФЧП:

$$s_i^{(j)} = U_0 \omega_i(\beta^{(j)}) \eta \left(\frac{d-\varepsilon}{2} + (-1)^j \varphi \right), \quad i = \overline{1, L}, \quad j = 1, 2, \quad (1)$$

где U_0 — амплитуда электрической реакции одноэлементного фотоприемника на пятно рассеяния; ε — величина межэлементного технологического зазора;

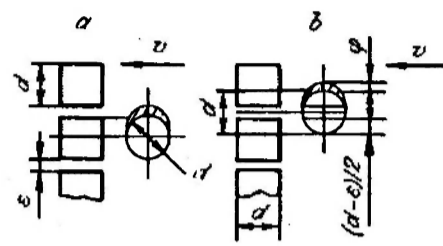


Рис. 1. Ситуации взаимного расположения пятна рассеяния и ФЧИ

$\gamma(\dots)$ — функция, описывающая форму канальных импульсов с амплитудами $U^{(j)} = U_0 \gamma(\dots)$, имеющими на интервале наблюдения L дискретных отсчетов, разделенных периодом опроса T_0 коммутатора.

Далее введем понятие стандартного положения $U_0 \gamma_i(0) \eta\left(\frac{d-\varepsilon}{2}\right)$, при котором центр пятна рассеяния лежит на оси, проходящей через середину межэлементного зазора (см. рис. 1, б), а начало канальных импульсов совпадает с серединой интервала дискретизации (рис. 2). Тогда случайное смещение относительно стандартного положения определяется величинами смещений канальных импульсов $\beta^{(j)}$, $j = 1, 2$; $\beta^{(2)} = \beta^{(1)} + T_x/T_0$, где T_x — время опроса одного канала:

$$\beta^{(j)} \in [-0,5; 0,5], \quad (2)$$

и смещением пятна рассеяния по вертикали φ :

$$\varphi \in [-0,5(d-\varepsilon), 0,5(d+\varepsilon)]. \quad (3)$$

Очевидно, что функция $\eta(\dots)$ должна обладать следующими свойствами: $\eta(\varphi = 0,5(d-\varepsilon)) = 0$, $\eta(\varphi = 0,5(d+\varepsilon)) = 1$, $\eta(\varphi = 0) = 0,5$ при $\varepsilon = 0$, которые обеспечивают при соответствующем выборе величины φ переход из одной ситуации в другую. Полученная модель (1) является в общем случае нелинейной относительно параметров $\beta^{(j)}$ и φ , которые можно считать равномерно распределенными величинами в интервалах (2) и (3) соответственно.

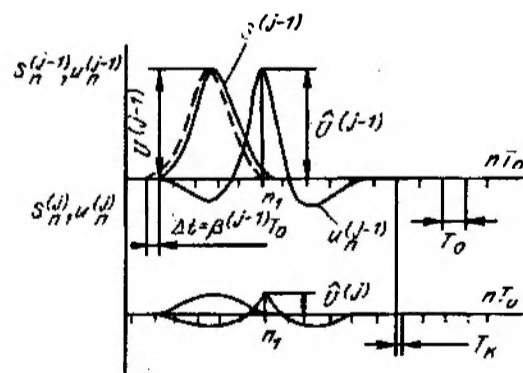
Поскольку вдоль столбцов кадра дискретные отсчеты флуктуационного шума $\xi_i^{(j)}$, $i = \overline{1, L}$, $j = 1, 2$, статистически независимы, то ковариационная матрица наблюдений шума имеет вид:

$$R = \text{diag}[R_0, R_0],$$

где $R_0 = [r_{il}]$ — ковариационная матрица канального шума; $r_{il} = \langle \xi_i^{(j)}, \xi_l^{(j)} \rangle = \langle \xi_i^{(j)}, \xi_l^{(j)} \rangle = 0$, $i, l = \overline{1, L}$, $\langle \cdot \rangle$ — символ статистического усреднения.

В качестве модели структурной помехи удобно принять квазидетерминированный процесс $c(t) = 0$ со случайными начальными условиями, так что на интервале существования канальных импульсов величина помехи полагается постоянной: $c^{(j)} = c_i^{(j)}$, $i = \overline{1, L}$, $j = 1, 2$. Наблюдаемый на выходе ФПУ сигнал точечного объекта, искаженный помехами, имеет вид:

$$z_i^{(j)} = s_i^{(j)} + c^{(j)} + \xi_i^{(j)}, \quad i = \overline{1, L}, j = 1, 2. \quad (4)$$



Поскольку стандартное положение пятна рассеяния известно, то задача разработки метода измерения координат точечного объекта формулируется

Рис. 2. Канальные импульсы и реакции нерекурсивного фильтра с весовой функцией K_U

как задача получения оценок смещений $\hat{\beta}, \hat{\varphi}$ на основе обработки двумерного массива данных вида (4).

Решение. Представим нелинейную функцию (1) тремя первыми членами ряда Тейлора и введем в рассмотрение новые переменные $V^{(j)} = U_0 \beta^{(j)}$, $W = U_0 \varphi$, $j = 1, 2$:

$$s_i^{(j)} \approx a_{ij} U_0 + b_{ij} W + e_{ij} V^{(j)}, \quad i = \overline{1, L}, \quad j = 1, 2, \quad (5)$$

где $a_{ij} = \gamma_i(0) \eta \left(\frac{d-\varepsilon}{2} \right)$, $b_{ij} = (-1)^j \mu a_{ij}$, $e_{ij} = \eta \left(\frac{d-\varepsilon}{2} \right) \frac{\partial \gamma_i(0)}{\partial \beta^j}$, $\mu = \partial \eta \left(\frac{d-\varepsilon}{2} \right) / \partial \varphi$.

Тогда совокупность наблюдений (4) можно записать в виде линейного матричного соотношения, связывающего вектор наблюдений $Z^T = (Z_1^T | Z_2^T)$ с вектором параметров $X^T = (U_0 W V^{(1)} V^{(2)} c^{(1)} c^{(2)})$ и вектором шума $v^T = (v_1^T | v_2^T)$:

$$Z = HX + v, \quad (6)$$

где

$$H = \begin{pmatrix} H_1 \\ H_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & 0 & h_{14} & 0 \\ h_{21} & h_{22} & 0 & h_{23} & 0 & h_{24} \end{pmatrix},$$

$$h_{j1}^T = (a_{j1}, \dots, a_{jL}), \quad h_{j2}^T = (b_{j1}, \dots, b_{jL}) = (-1)^j \mu h_{j1}^T,$$

$$h_{j3}^T = (e_{j1}, \dots, e_{jL}), \quad h_{j4}^T = \underbrace{(1, \dots, 1)}_{L \text{ раз}},$$

$$Z_j^T = (z_1^{(j)}, \dots, z_L^{(j)}), \quad v_j^T = (\xi_1^{(j)}, \dots, \xi_L^{(j)}), \quad i = \overline{1, L}, \quad j = 1, 2.$$

Считая введенные переменные условно независимыми, оценку вектора X можно найти методом наименьших квадратов [3]:

$$\hat{X} = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} Z,$$

которая с учетом структуры матриц R и H преобразуется к виду

$$\hat{X} = \hat{X}_1 + \hat{X}_2 = K_1 Z_1 + K_2 Z_2,$$

где

$$K_1 = \left(K_U \frac{1}{\mu} K_V K_C 0 K_c 0 \right)^T = p H_1^T R_0^{-1},$$

$$K_2 = \left(K_U - \frac{1}{\mu} K_V 0 K_V 0 K_c \right)^T = p H_2^T R_0^{-1},$$

$$p = (H_1^T R_0^{-1} H_1 + H_2^T R_0^{-1} H_2)^{-1}.$$

Таким образом, вычисление оценки вектора X сводится к вычислению оценок \hat{X}_1, \hat{X}_2 канальных импульсов, на основании которых определяются искомые оценки смещений:

$$\hat{\beta}^{(j)} = \hat{V}^{(j)} / \hat{U}^{(j)}, \quad j = 1, 2, \quad (7)$$

$$\hat{\varphi} = \frac{1}{\mu} \frac{\hat{U}^{(1)} - \hat{U}^{(2)}}{\hat{U}^{(1)} + \hat{U}^{(2)}}, \quad (8)$$

где

$$\hat{U}^{(j)} = \sum_{i=1}^L k_{U_i} z_i^{(j)}, \quad \hat{V}^{(j)} = \sum_{i=1}^L k_{V_i} z_i^{(j)}, \quad j = 1, 2.$$

Коэффициенты весовых функций обладают свойством:

$$\sum_{i=1}^L k_{U_i} = 0, \quad \sum_{i=1}^L k_{V_i} = 0,$$

что определяет инвариантность фильтров к величине структурной помехи.

Получение оценок смещений объекта (7), (8) возможно с помощью как компьютерных систем обработки изображений, так и специализированного аналого-цифрового вычислительного устройства (СВУ). Допустим, что длительность канальных импульсов меняется незначительно при разных значениях φ , тогда моменты максимумов текущих оценок амплитуд на выходе нерекурсивного фильтра с коэффициентами k_{U_i} , $i = \overline{1, L}$, совпадают и приходятся на момент n_1 окончания импульсов (см. рис. 2). С учетом последовательного опроса N каналов ФПУ коммутатором алгоритм работы СВУ можно представить следующим образом:

1. Вычисляется текущая оценка амплитуды $u_n^{(j)} = \sum_{i=1}^L k_{U_i} z_{n-i+1}^{(j)}$ и величины $v_n^{(j)} = \sum_{i=1}^L k_{V_i} z_{n-i+1}^{(j)}$ j -го канала ФПУ, причем на n -м такте в памяти хранится текущая оценка амплитуды предыдущего канала $u_n^{(j-1)}$, $j = \overline{1, N}$.
2. Если в j -м канале произошло обнаружение канального импульса (путем сравнения с порогом) и найдена оценка $\hat{U}^{(j)} = u_{n_1}^{(j)}$, то текущая оценка амплитуды в $(j-1)$ -м канале объявляется оценкой амплитуды канального импульса $\hat{U}^{(j-1)} = u_{n_1}^{(j-1)}$.
3. Производится вычисление оценок $\hat{\beta}^{(j)}$, $\hat{\varphi}$ по (7), (8).
4. Если оценка $\hat{\varphi}$ удовлетворяет условию

$$|\hat{\varphi}| < 1/\mu, \quad (9)$$

то пятно рассеяния попадает на две ФЧП, следовательно, искомыми оценками являются найденные по п. 3 оценки $\hat{\beta}^{(j)}$, $\hat{\varphi}$. Если оценка $\hat{\varphi}$ не удовлетворяет условию (9), то вычисляется текущая оценка амплитуды $(j+1)$ -го канала по п. 1. Если условие (9) не выполняется дважды при просмотре j -го и $(j+1)$ -го каналов, а в j -м канале обнаружен импульс, то пятно рассеяния попадает на одну ФЧП и ордината объекта лежит на оси, проходящей через середину ФЧП.

Тогда координаты точечного объекта в кадре изображения можно определить через оценки $\hat{\beta}$, $\hat{\varphi}$:

$$\hat{x} = (n_1 - 0,5(L-1) + \hat{\beta}) \frac{2d}{L}, \quad \text{если } |\hat{\beta}| > 0,5, \quad \text{то } \hat{\beta} = 0,5 \cdot \text{sgn}(\hat{\beta}); \quad (10)$$

$$\hat{y} = \begin{cases} (m_1 - 1)(d + \epsilon) - \frac{\epsilon}{2} + \hat{\varphi} & \text{при выполнении условия (9);} \\ (m_1 - 1)(d + \epsilon) + \frac{d}{2} & \text{при невыполнении условия (9),} \end{cases} \quad (11)$$

где m_1 — последний номер канала (строки), считая сверху, в котором произошло обнаружение импульсного сигнала.

Для технической реализации СВУ необходимо иметь АЦП, два цифровых фильтра (ЦФ1 и ЦФ2) с весовыми функциями $k_{u_i}, k_{v_i}, i = \overline{1, L}$, многоканальная работа которых осуществляется с помощью ОЗУ для хранения $N(L-1)$ выборок выходного сигнала ФПУ, регистры Рг, блоки обнаружения импульса (БИ) и максимума текущей оценки амплитуды (БМ), выполняющие операции сравнения кодов, а также блоки вычисления оценок $\hat{\beta}, \hat{\varphi}$ (координат x, y) БВХ, БВУ и блок проверки условия (9) БУ, построенные, например, на ПЗУ. Структурная схема СВУ приведена на рис. 3.

Эффективность разработанного метода измерения координат точечного объекта определялась путем его сравнения с методом со взвешиванием отсчетов полезного сигнала [1]. С помощью моделирования на ПЭВМ исследовалось влияние на точность измерения координат x, y дискретизации выходного сигнала ФПУ и коэффициента корреляции канального шума χ при различных отношениях сигнал/шум, числе отсчетов канального импульса L и величине зазора ϵ .

В качестве модели полезного сигнала была выбрана двумерная синус-квадратная функция (для пятна рассеяния с равномерным распределением освещенности по его площади):

$$s_i^{(j)} = U_0 \sin^2 \frac{(2i-1 + \beta^{(j)})\pi}{2L} \sin^2 \left(\frac{\pi(d-\epsilon)}{4d} + (-1)^j \frac{\pi\varphi}{2d} \right), \quad i = \overline{1, L}, \quad j = 1, 2. \quad (12)$$

Двумерный массив вида (4) формировался для сигнала (12) единичной амплитуды ($U_0 = 1$), где величины β, φ ($\beta^{(1)} = \beta^{(2)} = \beta$ при $T_k \ll T_0$) вырабатывались независимыми датчиками случайных чисел (ДСЧ) для статистической обработки или вводились с определенным шагом для исследования эффекта дискретизации в интервалах (2) и (3) соответственно. Координаты центра точечного объекта задавались следующим образом:

$$x = (0,5(L+1) + \beta) \frac{2d}{L}, \quad y = d + \frac{\epsilon}{2} + \varphi. \quad (13)$$

Элементы ковариационной матрицы канального шума R_0 имели вид $r_{il} = \alpha \chi^{|l-i|}, i, l = \overline{1, L}$, где α — дисперсия коррелированного шума, дискретные отсчеты которого $\xi_i^{(j)} = \xi_{i-1}^{(j)} \chi + \zeta_i^{(j)}, i = \overline{1, L}, j = 1, 2$. Здесь $\zeta_i^{(j)}$ — отсчеты нормального белого шума с дисперсией $\sigma^2 = \alpha(1 - \chi^2)$, вырабатываемые двумя независимыми ДСЧ, $j = 1, 2$.

Значения структурной помехи $c^{(j)}, j = 1, 2$, также вырабатывались двумя ДСЧ в интервале $[-2; 2]$.

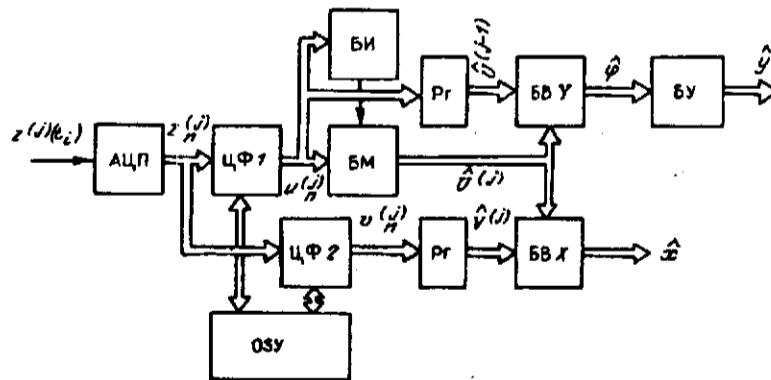


Рис. 3. Структурная схема СВУ

Оценки координат \hat{x} , \hat{y} для разработанного метода вычислялись по (10), (11) через оценки $\hat{\beta}$, $\hat{\varphi}$, определяемые по (7), (8) соответственно.

Оценки координат методом со взвешиванием находились по известным выражениям [1, 2] с учетом (13):

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^2 ip_{ij}}{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^2 p_{ij}} \frac{2d}{L}, \quad \hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^2 ip_{ij}}{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^2 p_{ij}} (d + \epsilon) - 0,5d - \epsilon,$$

где

$$p_{ij} = \begin{cases} z_i^{(j)} - \hat{c}^{(j)} & \text{при } (z_i^{(j)} - \hat{c}^{(j)}) \geq u_p, \\ 0 & \text{при } (z_i^{(j)} - \hat{c}^{(j)}) < u_p. \end{cases}$$

Здесь $\hat{c}^{(j)} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (c^{(j)} + \xi_i^{(j)})$ — оценка структурной помехи в j -й строке ($m = 20$). Величина порога u_p («отсечки» снизу) принималась равной $0,1U_0$.

Влияние дискретизации выходного сигнала ФПУ на точность измерения координат определялось при отсутствии шума и структурной помехи. С этой целью были получены зависимости погрешностей оценивания $\Delta x = x - \hat{x}$, $\Delta y = y - \hat{y}$ от величин смещения объекта β , φ при разных значениях L и ϵ . Сравнение показало, что оба метода обеспечивают примерно одинаковую точность измерения координат. При шести отсчетах точечного объекта ($L = 3$) максимальная погрешность в определении координат не превышает $0,1$ размера d ФЧП по горизонтали и $0,2d$ по вертикали. С увеличением числа отсчетов L канальных импульсов максимальная погрешность в определении горизонтальной координаты значительно уменьшается и уже при $L = 5$ достигает $0,02$ размера ФЧП. Вместе с тем увеличение числа отсчетов L практически не отражается на точности оценки y . Также было установлено, что увеличение межэлементного зазора ϵ незначительно влияет на точность оценивания координат разработанным методом по сравнению с известным. Этот факт можно объяснить наличием параметра ϵ в модели полезного сигнала (1), на основе которой рассчитываются весовые функции нерекурсивных фильтров.

Влияние коэффициента корреляции шума χ на точность оценивания координат исследовалось путем статистической обработки двумя методами двумерного массива данных вида (4). При этом вычислялись вторые начальные моменты погрешностей оценивания координат $\alpha_x^{(2)}$ и $\alpha_y^{(2)}$ (координаты x , y и их оценки брались в долях размера d ФЧП):

$$\alpha_x^{(2)} = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (x - \hat{x})^2, \quad \alpha_y^{(2)} = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (y - \hat{y})^2,$$

где M — число формирований массива (4), $M = 1000$.

На рис. 4, a и b соответственно показаны зависимости $\alpha_x^{(2)}(y)$ и $\alpha_y^{(2)}(x)$, полученные при $\epsilon = d/6$, $L = 5$ и отношении сигнал/шум $(1/\alpha) 10$. Из рис. 4 видно, что при сильно коррелированных шумах предложенный метод имеет преимущество перед методом со взвешиванием. Этот факт можно объяснить тем, что весовые функции фильтров рассчитываются через корреляционную матрицу канального шума, в то время как известный метод ориентирован на белый шум. Здесь же необходимо отметить, что при коэффициенте корреляции, близком к единице, флуктуационный процесс вырождается в низкочастотную помеху. При отрицательном смещении метод со взвешиванием может оказаться неработоспособным, поскольку отсчеты полезного сигнала будут

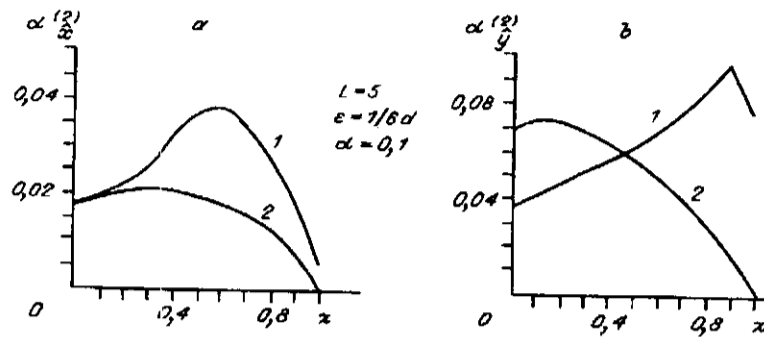


Рис. 4. Зависимости вторых начальных моментов погрешностей определения координат от коэффициента корреляции χ канального шума:
1 — метод со взвешиванием; 2 — разработанный метод

ниже порога. В этом случае инвариантность неркурсивных фильтров к постоянной составляющей сохранит работоспособность предложенного метода.

ВЫВОДЫ

Предложенный метод измерения координат точечных объектов по данным многоэлементного ФПУ эффективен при сильно коррелированных канальных шумах и отношении сигнал/шум больше 10.

Разработанный метод инвариантен к величине структурной помехи, т. е. не требует ее предварительной оценки и вычитания, а также менее чувствителен к величине межэлементного технологического зазора.

Полученный метод измерения координат точечных объектов допускает относительно простую техническую реализацию в виде специализированного аналого-цифрового вычислительного устройства, которое конструктивно совмещается с ФПУ и может работать в темпе развертки изображения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grossman S. B., Emmans R. B. Performance analysis and size optimization of focal planes for point-source tracking algorithm applications // Opt. Eng.—1984.—23.—Р. 167.
2. Мандражи В. П. Эффективность двумерной фильтрации сигналов при определении координат точечных объектов // Техника средств связи. Сер. Техника телевидения.—1982.—№ 5.
3. Сейдж Э., Мэлс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении: Пер. с англ. /Под ред. Б. Р. Левина.—М.: Связь, 1976.

Поступила в редакцию 29 июля 1993 г.